

Pianeti extrasolari (II)

Metodo dei transiti

Proprietà statistiche degli esopianeti Caratterizzazione delle proprietà fisiche

Lezione SP 6

G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

1

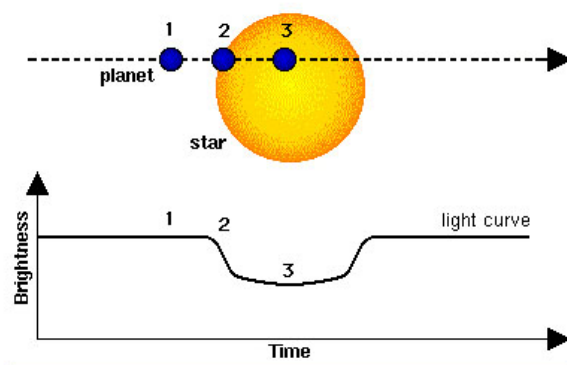
Metodi indiretti:

Variazioni del flusso luminoso stellare

- Si misurano variazioni della curva di luce stellare
 - Tali metodi indiretti funzionano unicamente per particolari configurazioni geometriche
- Metodi
 - Microlensing gravitazionale
 - Curva di luce di una stella di fondo non associata al pianeta
 - Metodo dei transiti
 - Curva di luce della stella che ospita il pianeta

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

Metodo dei transiti



- Se l'orbita del pianeta è allineata con la linea di vista si può rivelare la presenza del pianeta dallo studio delle variazioni della curva di luce dovute al transito del pianeta di fronte alla stella
 - Configurazione geometrica: $i \approx 90^\circ$

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

3

Metodo dei transiti

- **Profondità del profilo della curva di luce**
 - trascurando il flusso emesso dal pianeta e l'oscuramento al bordo del disco stellare ("limb darkening") si ha
$$\Delta F = (F - F_{tr}) / F = (R_p / R_*)^2$$

F : flusso osservato quando il pianeta è fuori dal transito
 F_{tr} : flusso osservato nel transito (minimo della curva di luce)
 R_p : raggio del pianeta
 R_* : raggio della stella
- **Raggio del pianeta**
 - Il metodo dei transiti è l'unico che da' una misura del raggio del pianeta R_p
 - Il raggio R_p si ottiene dalla profondità del profilo, data una stima indipendente del raggio stellare R_*

Per stimare R_* si fa un'analisi dettagliata della stella

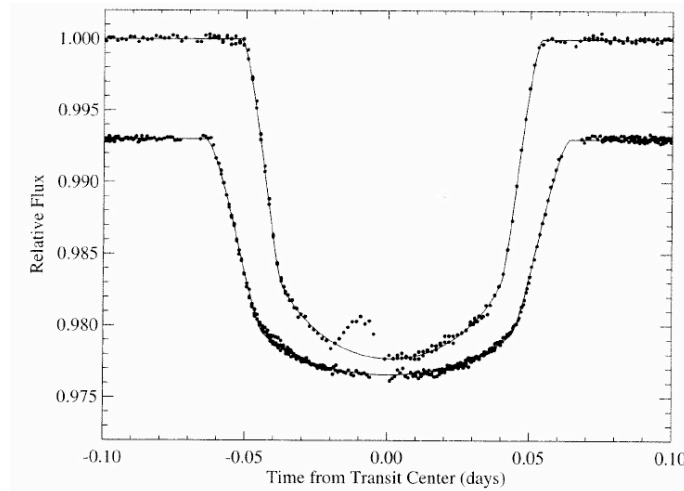
In realtà R_* può essere vincolato anche da altri parametri ricavabili dalla curva di luce

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

4

Metodo dei transiti

- **Richiede un'alta precisione fotometrica**
 - Esempi di profondità centrali attese per pianeti di diverso raggio in transito di fronte ad una stella di tipo solare ($R_* = R_\odot$)
 - Per un pianeta gigante $R_p = R_{\text{giove}} \Rightarrow \Delta F = 1\%$
 - Per un pianeta terrestre $R_p = R_{\text{terra}} \Rightarrow \Delta F = 0.01\%$



Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

5

Metodo dei transiti

- **Altri parametri misurabili dalla curva di luce**
 - Durata del transito
 - Durata dell'ingresso
 - Intervallo tra transiti successivi
- **Relazione con parametri orbitali e planetari**
 - L'intervallo tra transiti successivi è il periodo orbitale P
 - La durata del transito e la durata dell'ingresso sono proporzionali a $(1-b^2)^{1/2}$, dove b è il parametro d'impatto: $b = (a/R_*) \cos i$
 - Distanza proiettata tra il centro del pianeta e il centro del disco stellare
 - Combinando le diverse espressioni per la durata del transito e quella dell'ingresso si ottengono vincoli su R_* , M_* , a , R_p e $\cos i$
 - Si stimano R_* e M_* anche in maniera indipendente, da un'analisi dettagliata della stella (spettroscopia e modelli di evoluzione stellare)

Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2011)

6

Metodo dei transiti

- **Effetti selettivi**

- La probabilità geometrica di trovare un pianeta con il metodo dei transiti è proporzionale a R_*/a

R_* : raggio della stella; a : semi-asse maggiore orbitale

Valore tipico di probabilità: $P \sim 0.0045 (1 \text{ AU}/a) (R_*/R_\odot)$

Charbonneau et al. (2007)

- **Conseguenze**

Privilegiati piccoli valori di semiasse maggiore e quindi periodi brevi

Si trovano più facilmente pianeti molto vicini alla stella

ad esempio “hot-Jupiters”

Estremamente difficile trovare oggetti a distanze maggiori di 5 - 10 AU

- Tale effetto selettivo rafforza quello dovuto alla limitata baseline temporale delle osservazioni, che già di per se' ci porta a selezionare pianeti con periodi brevi

Metodo dei transiti

- **Necessità di surveys osservative**

- Per ovviare alla bassa probabilità di trovare un transito planetario sono necessarie surveys osservative che seguano simultaneamente un grande numero di stelle

- **Necessità di monitoraggio continuo**

- Osservazioni di lungo termine con copertura continua per non perdere l'evento del transito

Collaborazioni tra vari osservatori internazionali per garantire la copertura continua mediante osservazione da telescopi a diverse longitudini geografiche

Principali risultati degli studi di esopianeti

Proprietà statistiche

Proprietà fisiche

Proprietà statistiche degli esopianeti

Liste aggiornate di esopianeti possono essere trovate nei siti:
exoplanets.org e exoplanet.eu

All Candidates detected	763 planets
▶ <u>Candidates detected by radial velocity or astrometry</u> <i>update : 24 April 2012</i>	559 planetary systems 701 planets 94 multiple planet systems
▶ <u>Transiting planets</u> <i>update : 24 April 2012</i>	196 planetary systems 230 planets 29 multiple planet systems
▶ <u>Candidates detected by microlensing</u> <i>update : 22 March 2012</i>	14 planetary systems 15 planets 1 multiple planet systems
▶ <u>Candidates detected by imaging</u> <i>update : 05 April 2012</i>	27 planetary systems 31 planets 2 multiple planet systems
▶ <u>Candidates detected by timing</u> <i>update : 23 January 2012</i>	11 planetary systems 16 planets 4 multiple planet systems

Proprietà statistiche degli esopianeti

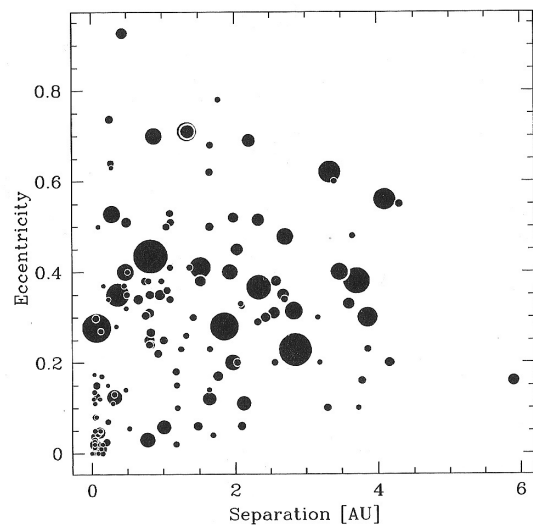
- **Principalmente basate sui pianeti scoperti con il metodo delle velocità radiali e dei transiti**
 - Per una corretta interpretazione è fondamentale tenere in conto dei vari effetti selettivi che influenzano la rivelazione di esopianeti
- **Proprietà statistiche studiate**
 - delle orbite planetarie
Periodi orbitali, semiassi maggiori, eccentricità
 - dei pianeti
Con il metodo Doppler, $M_p \sin i$
Con il metodo dei transiti, R_p
 - delle stelle ospiti
Di particolare interesse, la metallicità

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

11

Proprietà statistiche degli esopianeti

- **Uno dei principali risultati degli studi di esopianeti è la grande varietà di proprietà osservate**
 - Come esempio vediamo in figura il grafico delle eccentricità e verso il semiasse maggiore a ; le dimensioni dei simboli sono proporzionali alle masse minime dei pianeti ($M \sin i$)
 - Si può notare la grande dispersione sia nei due parametri orbitali (a , e) che nelle masse
- **Tale varietà non è riscontrabile nel Sistema Solare**



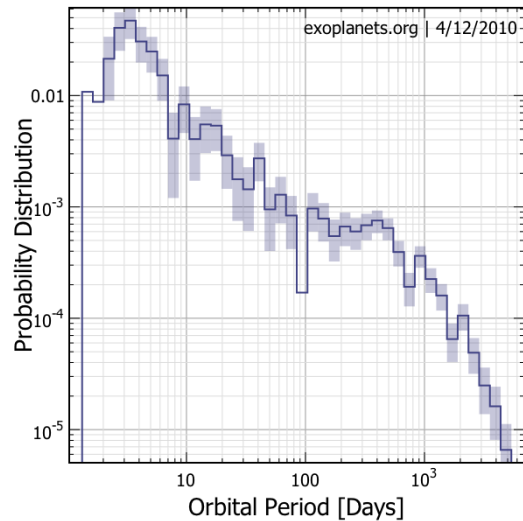
Udry et al. 2005

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

12

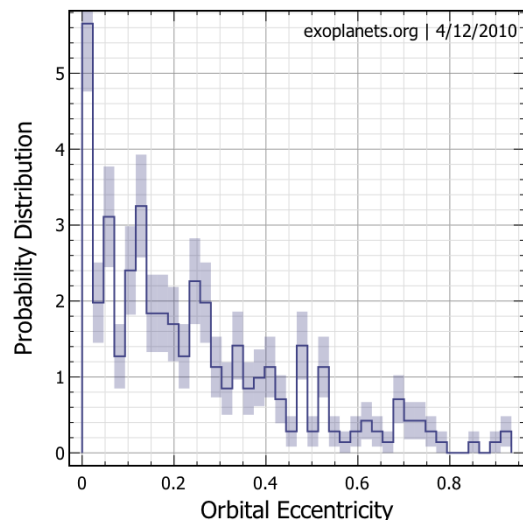
Distribuzione dei periodi orbitali

- Istogramma dei periodi orbitali P degli esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- **La distribuzione picca su periodi orbitali brevi**
 - Risultato di un doppio effetto selettivo
 - La limitata base temporale delle osservazioni favorisce la scoperta di pianeti con periodi brevi
 - A parità di massa, un pianeta più vicino alla stella (e quindi più piccolo P) introduce una maggior perturbazione gravitazionale sulla stella
- **Evidenza di un picco a $P \approx 3$ giorni**



Distribuzione delle eccentricità

- Istogramma delle eccentricità e degli esopianeti trovati con il metodo doppler
- **La distribuzione mostra una grande dispersione**
 - con valori di eccentricità che coprono tutto il possibile intervallo tra 0 e 1
- **Eccentricità mediamente molto più alte rispetto a quelle dei pianeti del Sistema Solare**



Masse (minime) degli esopianeti

Il limite di rivelamento in massa diventa
più stringente di anno in anno

“Saturni”

$$M \sim 0.3 M_{\text{giove}}$$

“Nettuni”

$$M \sim 0.05 M_{\text{giove}}$$

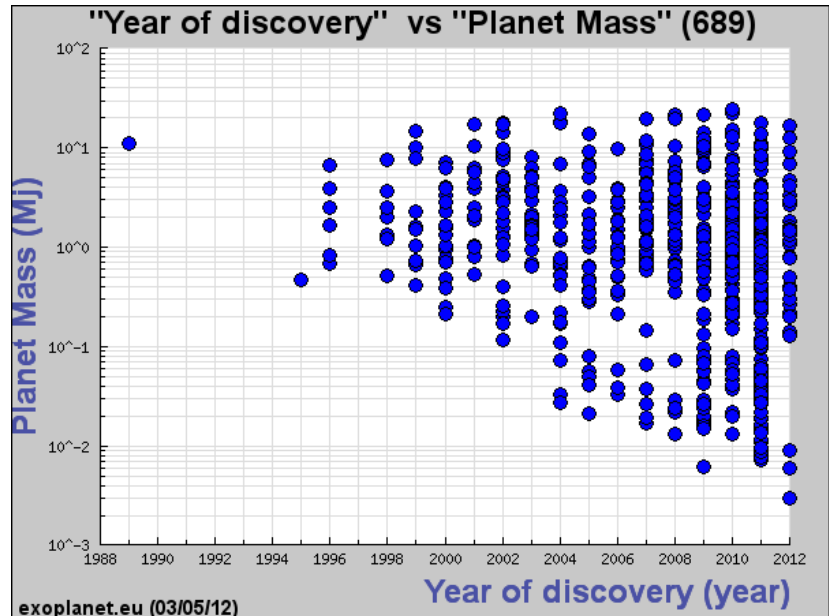
“Super-Terre”

$$M \sim 0.015 M_{\text{giove}}$$

$$M_p \sim 10 M_{\text{terra}}$$

Terrestri

$$M \sim 0.003 M_{\text{giove}}$$



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

15

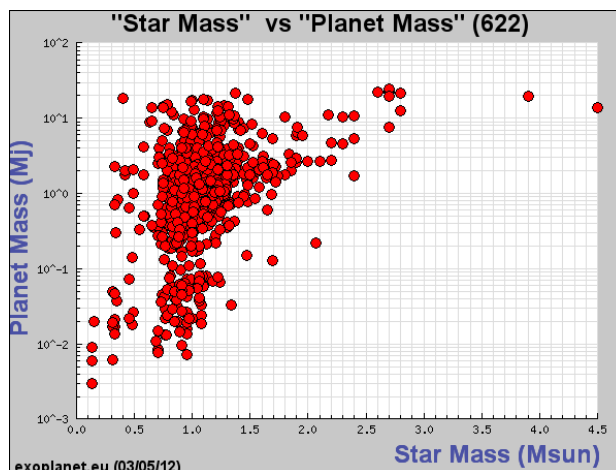
Masse planetarie e masse stellari

- La maggior parte delle stelle in cui sono stati scoperti esopianeti hanno masse attorno a quella solare

I pianeti di massa minore sono stati scoperti in stelle di bassa massa

In stelle più massicce si scoprono preferenzialmente pianeti più massicci

- Risultati influenzati da effetto selettivo: a parità di massa planetaria, la perturbazione gravitazionale è maggiore su stelle di piccola massa

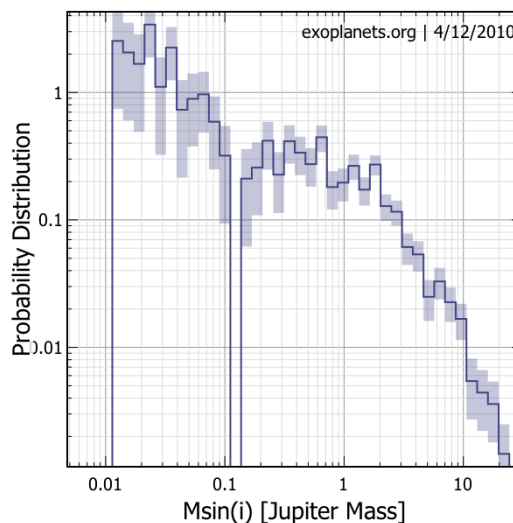


Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

16

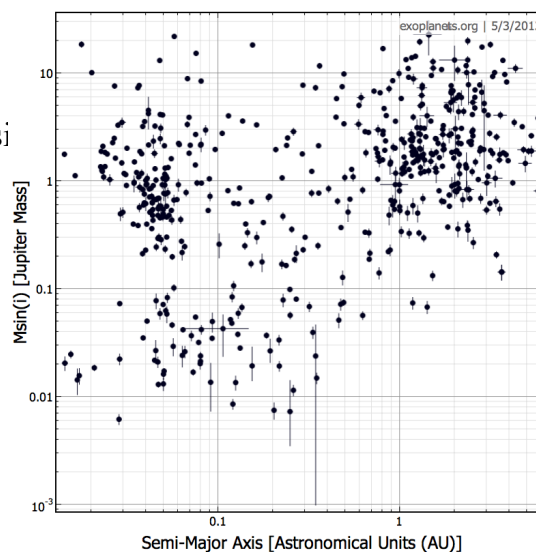
Distribuzione delle masse planetarie

- Distribuzione in massa $M \sin i$ degli esopianeti scoperti con il metodo Doppler
- **La distribuzione aumenta verso valori più bassi di massa**
 - Nonostante l'effetto selettivo che favorisce il rivelamento di pianeti massicci
- **Dall'estrapolazione di tale andamento ci aspettiamo un grande frequenza di pianeti di piccola massa**
 - Rilevabili in futuro con il miglioramento delle tecniche osservative



Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- **Grafico di $M \sin i$ verso a degli esopianeti scoperti con il metodo Doppler**
 - La maggior parte dei pianeti scoperti si trova entro poche unità astronomiche
- **Scoperta popolazione di pianeti di massa gioviana a distanze ≤ 1 AU dalla stella**
 - Chiamati “Hot Jupiters”
 - Risultato inatteso sulla base delle nostre conoscenze del Sistema Solare



Masse dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

- A grandi distanze dalla stella si trovano preferenzialmente pianeti massicci
 - Bias osservativo: pianeti lontani di piccola massa perturbano poco la stella
- In futuro si vuole cercare di capire quanto sia popolata la parte in basso a destra del grafico, dove cadono i pianeti del Sistema Solare

Exoplanet Roadmap Advisory Team (ESA)

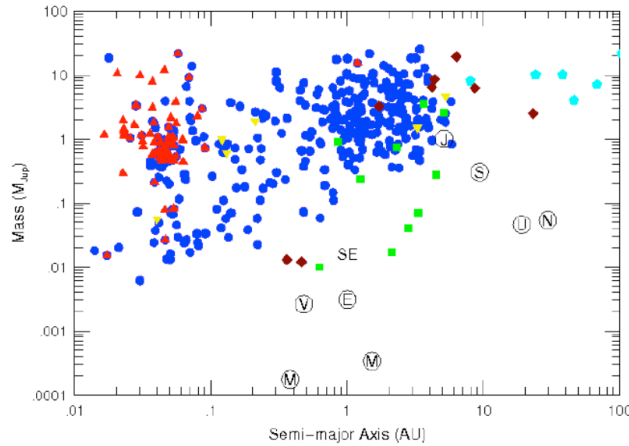


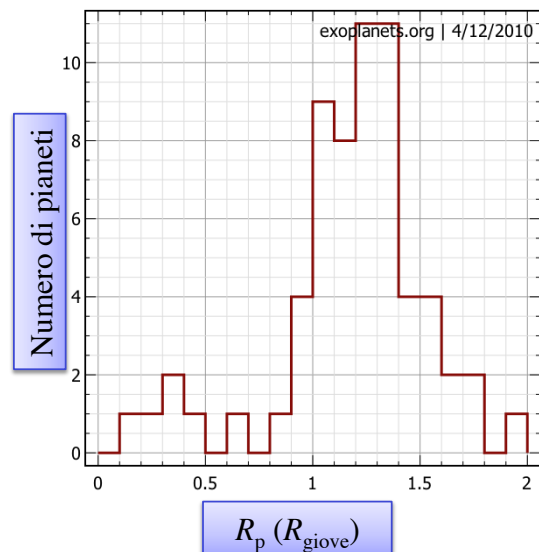
Fig. 1 Exoplanet discoveries from the various search methods in the Mass-Semi-major axis plane. Blue dots: Radial velocity detections; Red triangles: Transit detections; Inverted yellow triangles: astrometric detections; Green squares: Microlensing detections; Blue Pentagons: Imaging detections; Red diamonds: Timing detections. The letters mark the location of the planets in the solar system. "SE" denotes a Superearth with $5 M_{\text{Earth}}$.

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

19

Raggi di esopianeti

- Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti
- Picco nella distribuzione a valori relativamente alti di R_p
 - Risultato influenzato da effetti selettivi la profondità del profilo di transito nella curva di luce scala con $(R_p/R_*)^2$



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

20

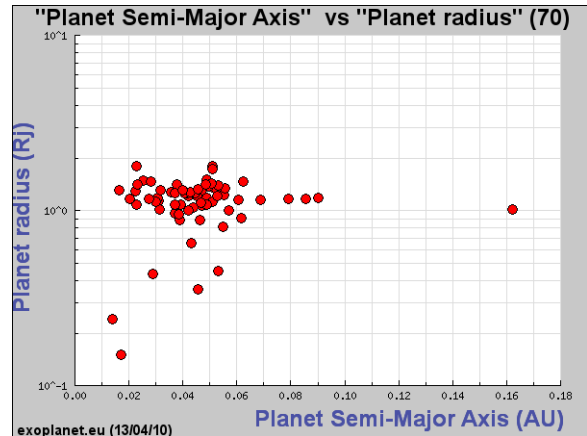
Raggi dei pianeti e semiassi maggiori orbitali

– Campione di esopianeti studiati con il metodo dei transiti

• I valori minori di raggio sono stati trovati a piccole distanze dalla stella

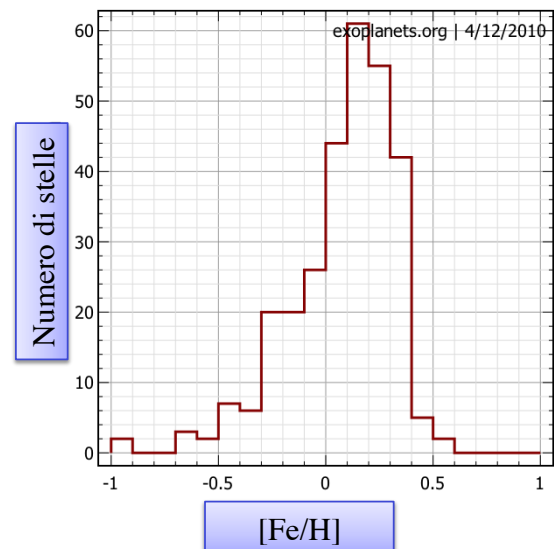
– Risultato influenzato da effetti selettivi

La probabilità geometrica di trovare un transito planetario scala con R_*/a



Proprietà delle stelle ospiti Distribuzione delle metallicità stellari

- Numero di stelle ospiti di pianeti in funzione della metallicità stellare $[Fe/H]$
 - In grande maggioranza, pianeti giganti
- Le stelle che ospitano pianeti giganti hanno un livello di metallicità più alto delle stelle senza pianeti
 - Mediamente superiore alla metallicità del Sistema Solare
- Diverse spiegazioni sono state proposte
 - le stelle con dischi protoplanetari accrescerebbero più materiali rocciosi
Ipotesi non confermata dalle osservazioni
 - effetto di inibizione della formazione planetaria quando la metallicità della nube protostellare è troppo bassa
Attualmente accettata
- Tale effetto non sembra essere presente in pianeti di piccola massa



Proprietà fisiche degli esopianeti

- **Caratterizzazione degli esopianeti**
 - Studio delle loro proprietà fisiche
 - I planeti osservabili mediante il metodo dei transiti sono i più promettenti per tale tipo di studi
 - Mediante l'applicazione di varie tecniche si possono ricavare:
 - Densità media del pianeta
 - Emissione termica e riflessione del pianeta
 - Spettro di assorbimento dell'atmosfera planetaria

Combinazione di diversi metodi osservativi

- L'applicazione di diversi metodi di rivelazione di esopianeti ci permette di combinare i parametri osservativi ottenuti da ciascun metodo, aumentando la possibilità di caratterizzare del pianeta
- **Metodo delle velocità radiali + metodo astrometrico**
 - Si determina il termine $\sin i$ e si misura quindi la massa del pianeta, anziché un limite inferiore
 - Non ancora utilizzato, data l'assenza di dati ottenuti con il metodo astrometrico
- **Metodo della velocità radiali + metodo dei transiti**
 - Si combina la massa, ottenuta con il metodo doppler e $\sin i \sim 1$, con il raggio, ottenuto con il metodo dei transiti
 - In tal modo si misura direttamente la densità media del pianeta
 - Metodo in via di intensa applicazione

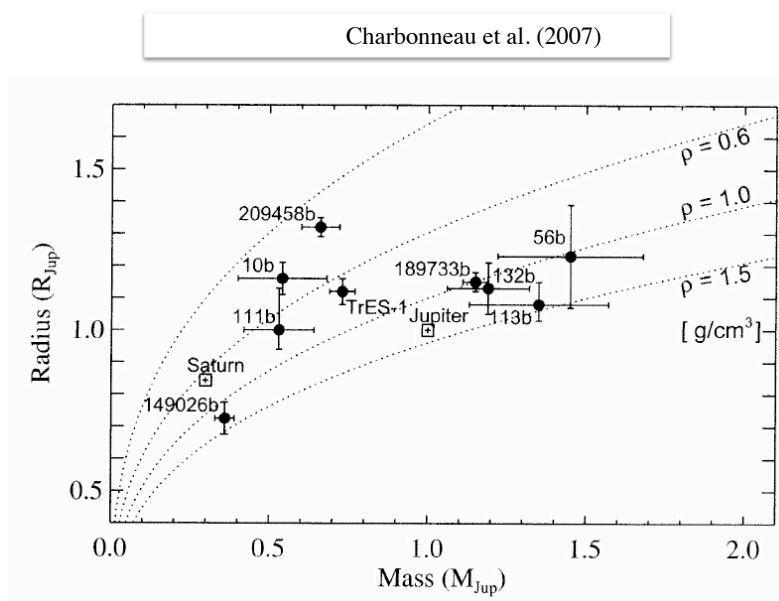
Densità media

- **Densità media**

- Lo studio della densità media, ρ , ci permette di discriminare tra pianeti di tipo gassoso, ghiacciato o roccioso

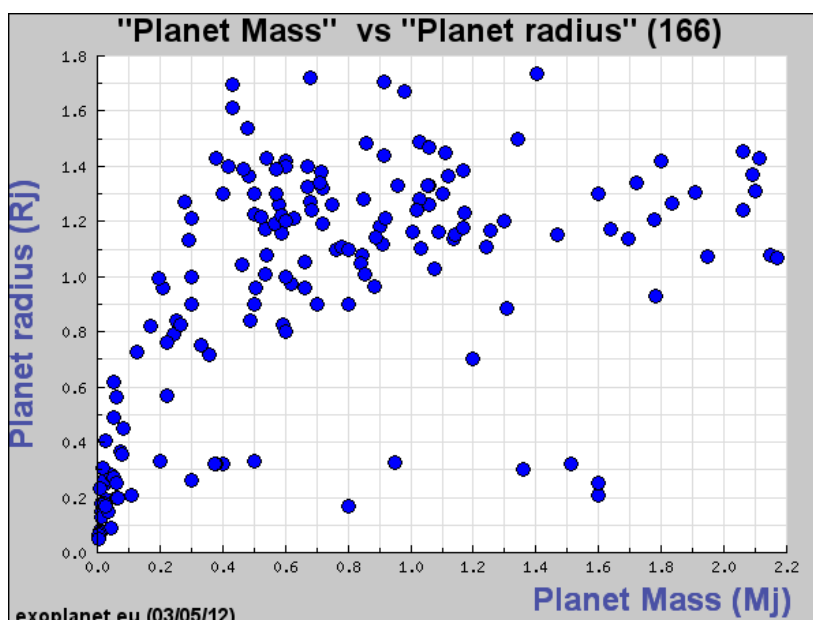
- La maggior parte dei risultati sinora ottenuti indicano valori di densità media $\rho \sim 1 \text{ g cm}^{-3}$, o anche più bassa

- Indicativi di pianeti gassosi



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

25



Raggi e masse per un campione aggiornato (maggio 2012) di 166 esopianeti. Si possono identificare gli “inflated jupiters”, con raggio superiore a quello di Giove, a parità di massa; inattesi in quanto Giove e Saturno differiscono in raggio solo del 18% nonostante differiscano in massa di un fattore 3.

Si cominciano a trovare numerosi esempi di pianeti rocciosi, con densità media comparabile a quella della Terra.

Emissione degli esopianeti

- Per quanto debole rispetto all'emissione stellare, gli esopianeti emettono radiazione
 - Emissione termica del pianeta
Lo studio dell'emissione termica, nella banda infrarossa, ci da' informazione diretta sulla temperatura superficiale
 - Riflessione della luce stellare
Lo studio della riflessione della luce stellare, nella banda visibile, ci da' informazioni sull'albedo del pianeta
- Metodi per studiare l'emissione degli esopianeti
 - Imaging diretto
Se il pianeta è risolto dalla stella si può misurarne l'emissione termica
Ma non l'albedo data la grande distanza tra pianeti e stella nel caso di pianeti scoperti con questa tecnica
 - Transiti secondari

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

27

Temperature ricavate dall' emissione termica di esopianeti usando il metodo di imaging diretto

Usando modelli di evoluzione planetaria si possono stimare indirettamente le masse dei pianeti

Exoplanet Roadmap Advisory Team (ESA)

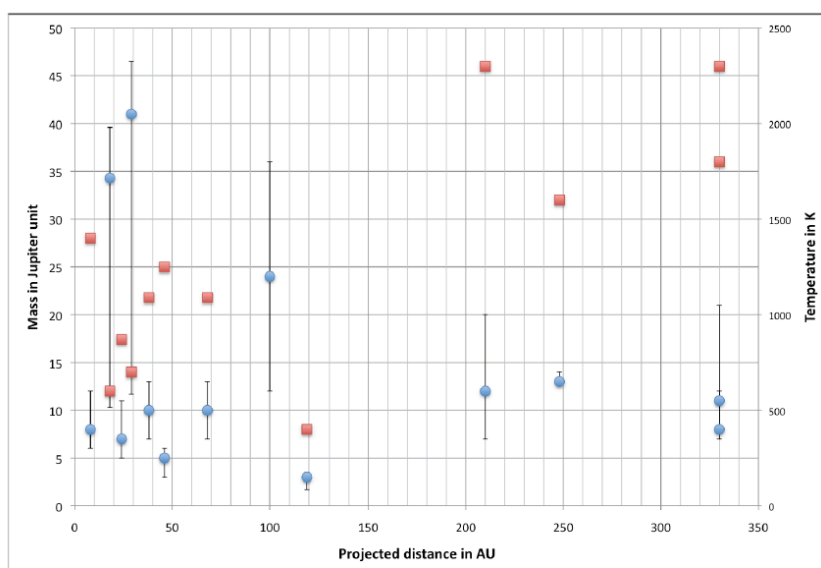


Fig. 2 : Estimated mass (blue dots) and temperature (red squares) vs. separation diagram of young planet candidates found by direct imaging.

Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)

28

Transiti secondari

- **Transito secondario**

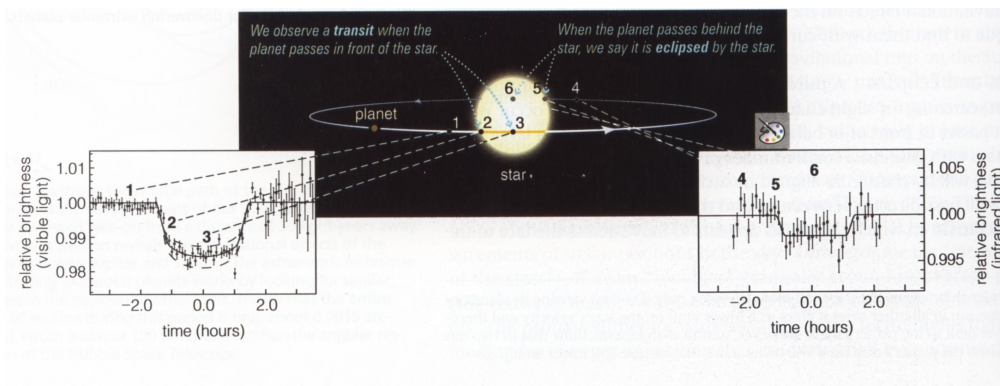
- Corrisponde al passaggio del pianeta dietro alla stella
Se la configurazione geometrica e i parametri orbitali lo permettono

- **Curva di luce del transito secondario**

- Fuori dal transito: la luce del pianeta, seppur debole, si somma a quella della stella
- Durante il transito: si vede solo la luce della stella e c'è quindi una lieve diminuzione nella curva di luce

- **Importanza del transito secondario**

- La differenza $F - F_{tr}$ in questo caso ci dà direttamente l'emissività del pianeta
- L'effetto è massimo nell'infrarosso e ci permette di studiare l'emissione infrarossa del pianeta



Astronomia Osservativa C, SP 6, Vladilo (2011)